

УДК 535.2

ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНЫЕ ПАРЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

С.В. Петрушкин

Аннотация

В работе представлена идея управления прямыми и непрямыми переходами в полупроводниках, облучаемых внешним когерентным источником света. Мы предлагаем использовать активированную гетероструктурную геометрию материала, в котором заданное распределение донорно-акцепторных пар позволит контролировать плотность электрон-дырочных состояний. Обсуждается применение этого метода для лазерного охлаждения полупроводников.

Ключевые слова: охлаждение, антистокс, диагностика, релаксация, полупроводники, температура, наночастицы.

Введение

Хорошо известно, что надежность работы и стабильность параметров микро- и нанoeлектронных устройств в значительной степени определяются их температурным состоянием. С другой стороны, развитие высоких технологий на сегодняшний день ставит перед исследователями проблему качественного повышения производительности и минитюаризации устройств по обработке информации. Переход к новым масштабам требует от разработчика привлечения новых физических принципов для осуществления прорыва в указанной проблеме – это и создание новых методов теплового расчета отдельных элементов вычислительных устройств, и конструкторская разработка эффективных способов их охлаждения.

Электронные устройства и чипы памяти, в основе которых лежит управление спинами и интегрированная миниатюрная система тепловой стабилизации, обещают быть более быстродействующими, чем электронные аналоги, и потреблять меньше энергии. В числе главных достоинств полупроводников и гетероструктур, является их дешевизна и доступность. Наибольшие практические перспективы имеют исследования соединений с высокой стабильностью и способностью интегрироваться в разработанные нами схемы оптического твердотельного рефрижератора [1, 2].

Метод лазерного охлаждения твердотельных сред на сегодняшний день представляется единственным способом построения компактного устройства, охлаждающего от комнатной температуры до температур, меньших, чем те, которых можно достигнуть при помощи устройств на основе эффекта Пельтье или электромеханических кулеров. Проблема лазерного охлаждения твердотельных образцов как экспериментально, так и теоретически активно разрабатывается с конца 90-х годов XX в. [3]. Несмотря на грандиозные успехи в лазерном охлаждении кристаллов и стекол, к настоящему времени лазерное охлаждение полупроводников еще не было реализовано.

Между тем полупроводниковые наночастицы вызывают большой интерес благодаря их уникальным химическим и физическим свойствам. В этих соединениях квантоворазмерный эффект влияет на ширину запрещенной зоны, что делает их привлекательными для изготовления как оптоэлектронных излучателей, так и одноэлектронных транзисторов, дисплеев на квантовых точках, лазеров и др. Распределение электронных состояний в полупроводниковых наночастицах, которое определяет многие его физические свойства, можно варьировать путем изменения состава нанокристалла, его формы и размеров. Комбинация свойств, зависящих от размера и формы нанокристалла, простота изготовления и обработки делают нанокристаллы перспективными кандидатами для использования в целях создания систем лазерного охлаждения устройств фотоники и спинтроники.

Донорно-акцепторные пары для охлаждения полупроводника

Оптическое охлаждение твёрдого тела происходит в том случае, когда при облучении образца лазером средняя энергия излучённых телом фотонов превосходит энергию поглощённых фотонов [2]. Иными словами, это происходит тогда, когда антистоксовая эмиссия, протекающая на частотах, больших, чем частота излучения лазера накачки, доминирует над стоксовой эмиссией, частоты которой имеют меньшие значения, при условии, что скорости безызлучательных переходов из возбуждённых состояний пренебрежимо малы по отношению к скоростям оптических переходов. В этом случае происходит охлаждение внутренних степеней свободы, по меньшей мере две из которых связаны теплообменом с окружением.

В полупроводниках переход электронов из зоны проводимости и переход дырок из валентной зоны осуществляются за счет электронно-дырочной рекомбинации свободных носителей одного типа со связанными носителями противоположного типа. В этом случае энергия взаимодействия обусловлена электростатическим взаимодействием заряженных частиц и отбор излишней энергии происходит либо с помощью одного или более решеточного фонона, либо посредством трехчастичного столкновения, при котором энергия передается свободному носителю. Релаксация носителей в этих случаях описывается экспоненциальным законом. Если носитель заряда, электрон, путём поглощения лазерного излучения попадает в зону проводимости, имея кинетическую энергию ниже среднетепловой, затем приобретает её и покидает зону проводимости путем спонтанной рекомбинации, являясь уже более «горячим», то температура ансамбля носителей в зоне проводимости будет понижаться. Носители заряда, участвующие в этом процессе, являются неравновесными. Ансамбль неравновесных носителей, в свою очередь, за счет взаимодействия с фононами будет охлаждать кристаллическую решетку.

При поглощении падающего излучения или рекомбинации электрона и дырки очень важно управлять тем, как и каким возбуждением в кристалле передается энергия. В кристаллах со слабой электрон-фононной связью передача сразу большой порции энергии в фононную подсистему решетки маловероятна, поскольку это требует рождения в одном акте громадного количества фононов. Поэтому любая возможность дробления выделяемой при поглощении или рекомбинации энергии, например через уровни дефектов или примесных центров в запрещенной зоне, резко увеличивает вероятность поглощения или рекомбинации соответственно.

Таким образом, скорость безызлучательной релаксации является одним из критических параметров в предложенной схеме лазерного охлаждения. Диапазон изменения его значений предъявляет достаточно строгий критерий отбора материала по «чистоте».

Оптические переходы донор–акцептор в легированном слабо компенсированном широкозонном полупроводнике могут быть использованы для осуществления

цикла охлаждения в том случае, когда поглощение света происходит при переходе акцептор \rightarrow донор, а рекомбинация — с излучением между зонами проводимости и валентной зоной. Полоса поглощения донорно-акцепторного перехода меняется в относительно широком спектральном диапазоне и может иметь сложную форму.

Определим эффективность охлаждения η как отношение мощности охлаждения к мощности излучения, поглощенного при данной лазерной накачке на частоте ν_L . В условиях, когда квантовый выход люминесценции близок к единице, энергия охлаждения на один фотон равна разнице между средней энергией флуоресценции и поглощенной энергией, и для эффективности охлаждения получаем

$$\eta \approx \frac{k_b T}{h\nu_L},$$

где k_b — постоянная Больцмана, T — температура окружающей среды

Пусть ширина запрещенной зоны есть E_g . Антистоксов сдвиг в спектре флуоресценции можно оценить суммарной энергией ионизации донорного E_d и акцепторного E_a центров. Максимум полосы поглощения находится в интервале, определяемом суммарной рекомбинационной энергией донорно-акцепторной пары $E_{da} = E_g - E_d - E_a$ и энергией кулоновского вклада E_c .

Таким образом, при поглощении через донорно-акцепторные пары выигрыш в эффективности охлаждения составит

$$\eta_{da} - \eta = \frac{E_a + E_d + E_c}{h\nu_L} > 0.$$

Может показаться, что величина кулоновского вклада $E_c = ke^2/(\epsilon r)$ не зависит ни от типа пар, ни от среднего расстояния между примесями, а определяется случайной переменной r — расстоянием между донором и акцептором.

Во-первых, заметим, что с увеличением мощности накачки число вовлеченных в процесс охлаждения донорно-акцепторных пар также возрастает и среднее расстояние r между ними эффективно уменьшается. Как следствие, это приводит к дополнительному сдвигу в область больших энергий и увеличению эффективности охлаждения η_{da} . А поскольку вероятность перехода зависит от степени перекрытия волновых функций электронов и дырок в парах, то уменьшение r также сказывается и на скорости рекомбинации.

Во-вторых, взаимодействие между примесями и собственными дефектами в процессе роста может привести к определенной корреляции в относительном расположении примесей в решетке. Возникающие ассоциации примесей должны оказывать существенное влияние на кинетику донорно-акцепторных переходов и могут быть охарактеризованы посредством исследования кинетики флуоресценции этих пар. Как следствие, открываются новые перспективы в исследовании свойств материала, недоступные для других методов.

В заключение отметим, что основная трудность в реализации предложенной техники охлаждения заключается в следующем. Необходимо обеспечить условия эффективного поглощения с тем, чтобы большинство фотоиндуцированных носителей заряда оказалось в зоне проводимости и валентной зоне. Например, большая вероятность излучательных межзонных переходов в прямозонных полупроводниках приводит к тому, что спектральное положение полосы донорно-акцепторных пар не достигает равновесных значений, которые мы выше взяли за основу. Это происходит вследствие того, что значительная часть электронов и дырок, связанных на примесях, рекомбинирует посредством туннельных переходов между ближайшими соседями. Поэтому как концентрация примесей, так и энергии ионизации

донорного и акцепторного центров должны подбираться специальным образом путем численных расчетов для конкретных материалов при различных температурах окружающей среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-02-00878) и гранта Президента РФ (МК-4277.2011.2).

Summary

S.V. Petrushkin. Donor-Acceptor Pairs for Optical Cooling of Semiconductors.

In this paper, we present the idea of controlling direct and indirect transitions in semiconductors under radiation of a coherent source of light. We suggest using impurity bands with donor-acceptor pairs in order to modify the density of electron-hole states. We discuss a simple laser-cooling regime for such doped semiconductor system.

Keywords: cooling, anti-Stokes, diagnostics, relaxation, semiconductors, temperature, nanoparticles.

Литература

1. *Петрушкин С.В., Самарцев В.В.* Твердотельный оптический рефрижератор: проблемы и ожидания. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2003. – 182 с.
2. *Петрушкин С.В., Самарцев В.В.* Лазерное охлаждение твердых тел. – М.: Физматлит, 2005. – 224 с.
3. *Epstein R.I., Buchwald M.I., Edwards B.C., Gosnell T.R., Mungan C.E.* Observation of laser-induced fluorescent cooling of a solid // *Nature*. – 1995. – V. 377. – P. 500–506.

Поступила в редакцию
23.11.12

Петрушкин Сергей Валериевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории нелинейной оптики, Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН, г. Казань, Россия.

E-mail: *petrushkin@kfti.knc.ru*